

那曲夏季云宏观特征的毫米波雷达资料研究

郑佳锋^{1,2*}, 杨华^{1,3}, 曾正茂⁴, 刘黎平³, 邹明龙^{1,3}, 曾震瑜^{1,3}

- (1. 成都信息工程大学, 大气科学学院, 四川 成都 610225;
2. 中国气象局交通气象重点开放实验室, 江苏 南京 210008;
3. 中国气象科学研究院, 灾害天气国家重点实验室, 北京 100081;
4. 福建省气象局, 福建省气象信息中心, 福建 福州 360001)

摘要: 为提高毫米波雷达对高原地区云宏观参数的观测能力, 提出一种改进的反演方法, 对比了该方法结果与激光云高仪(CL31)、Himawari-8卫星(HW8)观测结果的差异, 并研究了那曲夏季空中云宏观参数的垂直分布和日变化特征。结果表明, 提出的方法可以改善以往云边界检测法的云层错位和距离旁瓣回波影响的不足。雷达反演的云底比CL31高、云顶比HW8高, 但雷达与二者结果的垂直分布和日变化非常一致。雷达对多层云的云底探测优于CL31, 对云顶反演也较HW8可靠。距离旁瓣对不同云类的宏观参数探测都有显著影响。

关键词: 毫米波云雷达; 云宏观参数; 云高仪; Himawari-8卫星; 青藏高原

中图分类号: P407.2 文献标识码: A

Cloud macro-physical characteristics over Nagqu in summer observed by a millimeter-wave radar

ZHENG Jia-Feng^{1,2*}, YANG Hua^{1,3}, ZENG Zheng-Mao⁴, LIU Li-Ping³, ZOU Ming-Long^{1,3},
ZENG Zhen-Yu^{1,3}

- (1. School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China;
2. Key Laboratory of Transportation Meteorology, China Meteorological Administration, Nanjing 210008, China;
3. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;
4. Fujian Meteorological Information Center, Fujian Meteorological Bureau, Fuzhou 360001, China)

Abstract: To improve the retrieval accuracy of cloud macro-physical parameters (cloud base height, CBH; cloud top height, CTH; cloud thickness, CTk; and cloud layer number, CLN) over the plateau area using millimeter-wave radar (MMCR) measurements, this study proposed an improved retrieval method. Differences between MMCR- and ceilometer CL31- derived CBHs, and between MMCR- and Himawari-8 (HW8)- retrieved CTHs were analyzed. The vertical distribution and diurnal variation of clouds over the Nagqu of Tibetan Plateau in summer observed by these three instruments were also investigated and compared in detail. Results indicate that the presented method can avoid the influences of range sidelobe and cloud layer misclassification compared with the previous method. MMCR-derived CBHs and CTHs are both higher than the counterparts of CL31 and HW8, respectively. Whereas, their vertical distributions and diurnal variations are significantly coherent. The MMCR has a better performance on the CBH observation of multiple-layered clouds than CL31, and similarly can obtain more accuracy measurements of CTHs than HW8. The radar sidelobe echo has apparent influences on the retrievals of cloud macro-physical parameters for both different cloud types.

Key words: millimeter-wave cloud radar, cloud macro-physical parameters, ceilometer, Himawari-8 satellite, the Tibetan Plateau

PACS: 84. 40. Xb

收稿日期: 2020-06-27, 修回日期: 2020-10-05

Received date: 2020-06-27, Revised date: 2020-10-05

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1505702), 国家自然科学基金(41705008), 江苏省气象科学研究所北极阁基金(BJG201901), 成都信息工程大学人才引进项目(KYTZ201728)

Foundation items: Supported by National Key Research and Development Program of China (2018YFC1505702), National Natural Science Foundation of China (41705008), Beijing Foundation of Jiangsu Institute of Meteorological Sciences (BJG201901), and Scientific Research Foundation of Chengdu University of Information Technology (KYTZ201728).

作者简介(Biography): 郑佳锋(1988-), 男, 福建莆田人, 副教授, 理学博士, 主要从事雷达气象研究

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: zjf1988@cuit.edu.cn

引言

云是影响气候的重要因子,云宏观参数包括云底高度(cloud base height, CBH)、云顶高度(cloud top height, CTH)、云厚度(cloud thickness, CTK)和云层数(cloud layer number, CLN)等,这些参数与云辐射效应密切相关^[1-2]。青藏高原对亚洲的气候有重要影响,其在夏季是我国云频发的区域之一,因此观测和研究高原云的宏观特征,有助于正确评估云对气候变化的影响,具有重要的科学意义和价值。

目前,云宏观参数的观测手段主要包括无线电探空、飞机、卫星、云高仪和毫米波雷达等。无线电探空利用气球穿越云层得到的湿度廓线来反演^[3],但站点较稀疏、时间分辨率低,且不同地区云内外的饱和特征不一,因此反演结果具有较大不确定性和较粗的时间分辨率。飞机穿云可以直接探测云层的宏观和微观信息^[4-5],但成本高昂,且飞机起降易受地理环境的影响,同时观测的连续性也有限。云高仪根据云粒子对激光波束的后向散射来获取云底高度^[6],但无法得到CTH等参数,且在重污染或灰霾条件下,探测效果也会严重受影响。卫星是观测大范围云顶的重要手段,尤其对高原和海洋等无人区域,然而卫星分辨率对小尺度云的观测效果还欠佳,且对于中低层的薄云,反演结果会一定程度受地表辐射的污染从而产生偏差^[7]。相比上述设备,毫米波雷达(millimeter-wave cloud radar, MMCR)在云的综合观测能力和连续性方面具有明显优势,目前已成为云探测的主流设备。MMCR具有穿透性好、时空分辨率高、灵敏度高和持续观测能力强等特点。通过进一步反演,可以得到高时空分辨率的CBH、CTH、CTK和CLN等详细参数^[8-11]。如王喆等和Zhang等利用Ka波段MMCR反演了北京地区的CBH,并与探空和云高仪对比,结果发现雷达对非降水云的反演结果较为可靠^[12-13]。

受恶劣的自然环境限制,青藏高原上气象观测台站稀疏,目前对空中云的探测和研究还较为有限。过去一些研究主要基于气象卫星资料,且主要关注云的分布和时间变化等^[14-16],而对云宏观参数的精细化探测和研究还较少。近年来,随着我国第三次青藏高原试验(TIPEX-III)的开展,MMCR也逐渐被用于高原云的观测。吴翀等利用Ka波段MMCR资料反演了高原中部的CBH并与激光云高仪和激光雷达对比,结果发现毫米波雷达对高云云

底的探测效果远比云高仪和激光雷达好^[17]。以往研究,如王喆、Zhang和吴翀等反演的基本思路是基于云边界检测法,但并未考虑到雷达数据质量对反演结果的影响;此外,这种方法还存在一定的云层位置错判现象。因此,本文基于云边界检测法的基本思路,提出了一种改进的云宏观参数反演方法。并利用2014和2015年那曲地区的观测资料,定量评估了雷达反演结果与同址激光云高仪和同时刻Himawari-8卫星结果的差异;研究了三种设备观测结果的垂直分布和日变化特征,最后探讨了衰减和距离旁瓣对不同云类宏观参数探测的影响。本文旨在为毫米波雷达数据质量的提高以及更好地提取高原夏季云的宏观特征提供参考依据。

1 设备、资料和方法

1.1 设备和资料

使用的雷达是Ka波段的毫米波云雷达,在TIPEX-III期间,被安置于西藏那曲(4 507 m ASL, 92.04°E, 31.29°N),观测时间为2014和2015年7-8月。观测地点是青藏高原云雨活动最活跃的地区^[18]。本文还使用一部同址观测的激光云高仪和日本Himawari-8卫星资料。以下分别对三种设备及资料做简要介绍。

(1) Ka波段毫米波雷达(Ka-MMCR):该雷达采用固态、多普勒体制,通过发射脉冲电磁波并接收云粒子后向散射信号来获取空中的云层回波和运动信息。峰值功率大于100 W,工作频率为33.44 GHz(波长为8.9 mm),动态范围为75 dB,脉冲重复频率为8 333 Hz。雷达朝向天顶探测,天线波束宽度为0.3°,时间分辨率为8.8 s,空间分辨率为30 m,探测高度范围为0.12~15.3 km。本文研究采用该雷达的反射率因子Z和线性退极化比LDR资料,并涉及雷达参数有脉冲压缩比PCR、不同模式探测距离等。

(2) 激光云高仪(CL31):CL31是由芬兰Vaisala公司研制的激光云高仪,它通过发射激光脉冲并检测云粒子后向散射信号的突变来获取云底高度。激光波长为910 nm,峰值功率为310 W,脉冲能量为12 μJ。云高仪也朝向天顶探测,探测的高度范围为0~8 km,时间分辨率为16 s,空间分辨率为5 m。

(3) Himawari-8卫星(HW8):HW8卫星是日本于2014年10月发射的新一代静止气象卫星,其覆盖范围为60 S - 60 N, 80 E - 200 E。HW8云顶高度资料的时间分辨率为10 min,空间分辨率为5 km,整个

覆盖区域共 2410×2401 经纬网格, 本文选择离雷达站最近的格点资料与雷达进行对比和分析。

1.2 云宏观参数的雷达反演方法

利用垂直雷达探测云宏观参数的基本思路是通过检测雷达回波的上下边界来反演 CBH 和 CTH (简称云边界检测法)。云边界检测法简单、高效, 但应充分考虑雷达数据中一些质量问题的影响; 此外, 实际中应当要更谨慎考虑降水的影响。基于云边界检测法, 本文提出一种改进的反演方法。方法的主要流程如图 1 所示, 各个步骤详细介绍如下。

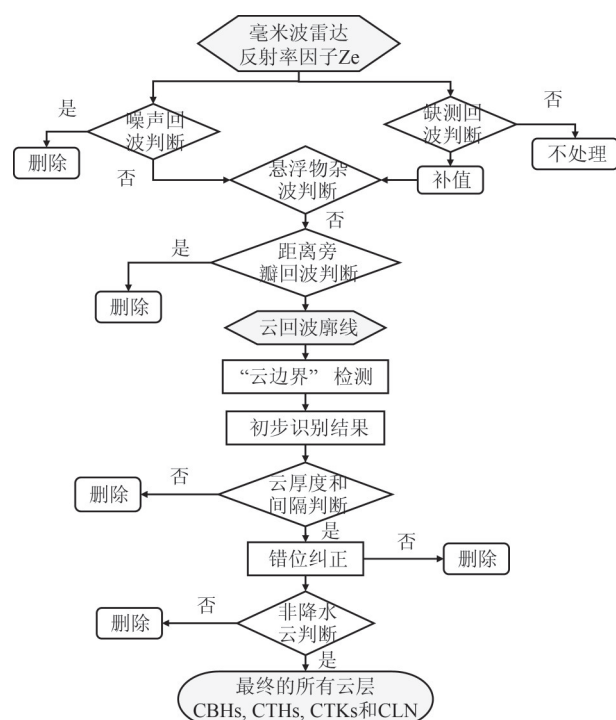


图 1 毫米波云雷达反演云宏观参数的流程示意图

Fig. 1 A flow chart of the retrieval of cloud macro-physical parameters using Ka-MMCR measurements

(1) 噪声和缺测判断: 通过设定 3×3 的滑动窗口对雷达噪声回波和缺测进行判断和处理。以窗口中心为判断目标, 统计 9 个距离库内有效和无效回波个数 N 。若中心为有效回波且 $N \leq 3$, 则中心被判定为噪声回波, 删除; 若中心为无效回波且 $N \geq 7$, 则中心被判定为缺测回波, 取周围有效回波的平均值代替。

(2) 悬浮物杂波判断: 悬浮物回波是一种非气象杂波, 主要由粉尘、昆虫和边界层温、压、湿梯度导致的湍流衍射回波引起; 观测表明, 这类杂波的高度一般分布在 3 km 以下, 回波特征呈现为非常弱的 Z 和强的 LDR ^[19-20]。本文借鉴郑佳锋等统计的那

曲地区悬浮物杂波阈值^[21], 即 $Z < 0$ dBZ 且 $LDR > -16$ dB, 以双阈值为判断条件滤除悬浮物杂波。

(3) 距离旁瓣回波判断: 由于雷达采用宽脉冲探测中高层的云, 并利用脉冲压缩处理来保持资料的高空间分辨率, 但宽脉冲会附带引起距离旁瓣回波。距离旁瓣回波是一种虚假的云雨回波, 严重时污染正常的云雨回波, 并影响云宏观参数的反演。对于垂直指向雷达, 距离旁瓣杂波会出现在强云雨回波的上下位置, 其影响范围与 PCR 有关。Moran 等人以 30 dB 为阈值来判断信号是否为旁瓣信号^[22]。Liu 等从雷达功率谱密度资料出发, 通过雷达实际参数设定判断范围和阈值进行旁瓣滤除^[23]。本文参考 Moran 的阈值对旁瓣回波进行判断和滤除, 具体做法为: 根据雷达宽脉冲为 $12 \mu s$, 对应的有效探测范围为 2.04~15.3 km, 因此旁瓣回波判断设定在该区间范围。雷达 PCR 为 60, 以有效探测范围内的任一个距离库为中心作为判断对象, 检测其上下 60 库 (1.8 km) 范围内是否存在高于它 30 dB 的回波; 若存在, 则判断为距离旁瓣回波, 否则为正常云雨回波。依次循环直至整根径向完成判断, 并删除所有旁瓣回波。

(4) 云边界检测: 对于云边界的确定, 不同探测手段有不同的方法, 本文以飞机观测作为参考。飞机观测表明, 当探测的云滴数浓度达到 10 cm^{-3} 时, 即探测到云层的底部或顶部^[24]。对于气象雷达而言, 一般采用阈值法判定, 如王喆^[12]等采用 -40 dBZ 作为阈值, 当云滴数浓度为 10 cm^{-3} 时, 云底和云顶对应的粒子平均直径为 $14.7 \mu m$, 这与飞机观测结果基本一致。因此, 本文也借鉴该阈值, 将每根雷达径向的连续回波中, 底部和顶部达到 (或最接近) -40 dBZ 的距离库对应高度视为云层的 CBH 和 CTH, 将两者的差作为 CTK, 连续回波段的数量估计为 CLN。

(5) 云层厚度和间隔判断: 考虑到有些松散云系可能会被误判为多层云, 将厚度小于 7 个库 (210 m) 进一步判断: 如果该薄云与上下云层间隔小于 24 库 (720 m) 则认为不是可靠的独立云层, 否则将其与相邻云层合并^[12]。

(6) 错位纠正: 由于空中云层是实时在移动和变化的, 有时会出现空中云层数在相邻时刻不一致的情况。如前一时刻识别了两层云, 而后一时刻较低的云层恰好消散, 这样云层数从两层变为一层, 使得前一时刻第一层云的参数和后一时刻第一层

云的参数无法正常匹配,即存在云层判断错位的现象。为了解决该问题,根据CBH和CTH在水平方向上变化的连续性,对它们再次进行相邻径向的比较和检验,如果发现当前CBH(CTH)与前后径向同一层云的结果偏差超过15个库(450 m),则将它与其他层云的结果进行匹配,如果满足则归为其他层云,如果所有云层都不满足,则舍弃;如果偏差在15个库以内,则认为属于当前云层。对CBH和CTH进行错位纠正后,相应的CTK和CLN也重新调整。

(7)非降水云判断:雷达反演的CBH实质是云回波的底部高度,当云体出现降水时,反演结果将产生偏差。因此,需要对降水和非降水进一步判断。吴翀等将雷达回波触地的云层当成降水云,而Zhang等根据地面雨强是否大于0.1 mm/h来判断^[13,17]。这两种判断方法仅当降水达到地表时才有效,而实际中,云层有部分降水是发生在空中,并受蒸发影响而不会降落至地表。因此我们采用以下方法判断:当反演的CBH如果小于那曲夏季平均抬升凝结高度LCL且它与地表范围内出现了3/5以上雷达回波,则认为该CBH是降水云的结果。降水云的CBH及其他参数被单独标记,最终仅保留非降水云的结果。

为了直观演示本文方法反演效果,选取那曲2015年8月31日一次含有不同云类的结果进行分析。如图2所示,雷达上空先后出现了尺度较大且深厚的积雨云和尺度较小的浅薄层积云。图2(a)和(b)分别为滤除距离旁瓣回波前和后的回波图,如黑色剪头位置,可见在2.04 km以上存在一些尖状或片状的距离旁瓣回波,而经过质量控制后,这些旁瓣回波基本被滤除。对比图2(c-d)中本文方法和以往方法反演的CBH和CTH,可以看出,以往方法得到的CBH比本文方法偏低,最大差异可达0.9 km;而CTH则偏高,最大差异为1.1 km。旁瓣所在处,以往方法对层积云厚度的反演明显偏大,最大差异达1.3 km。此外,反演的云层数也有差别,明显的如图2(a)矩形框所示部位。不考虑旁瓣的影响时,云体间隙较小使得仅反演出一层云;而滤除旁瓣后,上下云层分界更加明显,可以反演出两层云,显然后者更符合实际情况。图2(c-d)的方框位置,以往方法把7~9 km左右的一层薄卷云识别为第一层,而随后其下部的对流云也被判断为第一层,显然这两层云在空间上是不对应的;而本文方法将卷云判断为第二层云,其后下部的对流云为第

一层云;后者考虑了时序上错位的现象,更加符合实际的情况。

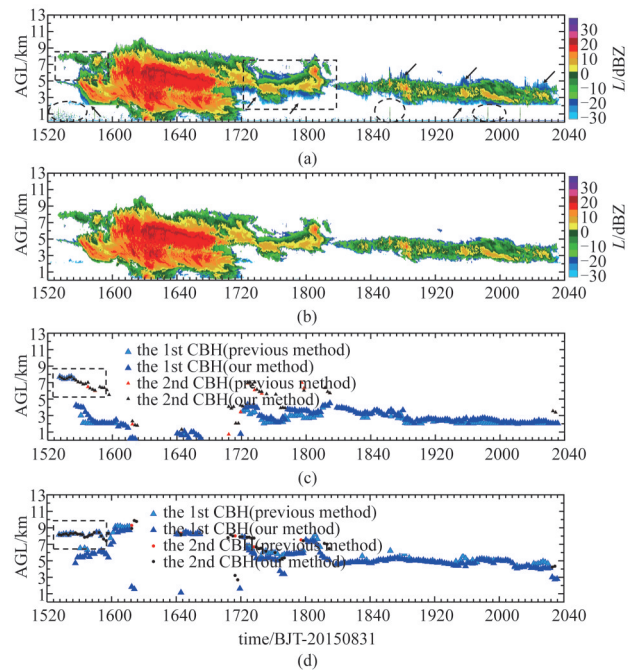


图2 那曲2015年8月31日积雨云和层积云的反演结果,(a)和(b)为旁瓣回波滤除前和后的反射率因子,(c)和(d)为以往方法和本文方法反演的CBH和CTH对比,1st和2nd表示识别的第一层和第二层云

Fig. 2 Retrieval results for cumulonimbus and stratocumulus clouds on August 31, 2015, (a) and (b) are radar reflectivity before and after sidelobe removal, (c) and (d) are radar-retrieved CBHs and CTHs for previous and our methods, 1st and 2nd denote the first-layer and second-layer clouds

2 MMCR反演结果与CL31和HW8对比

为了分析MMCR与CL31、HW8反演的云宏观参数差异,进一步对MMCR/CL31的CBH和MMCR/HW8的CTH分别进行定量对比。考虑到时间分辨率不同,首先对数据进行时间匹配,即将MMCR和CL31的结果统一按HW8的时间分辨率进行十分钟平均。此外,由于CL31在2015年7-8月、HW8在2014年7-8月没有观测,因此MMCR/CL31对比的数据时间段选为2014年7-8月,MMCR/HW8对比的数据时间段选为2015年7-8月。

如图3为MMCR/CL31和MMCR/HW8的点对点对比结果,图中黑色和红色叉号分别代表非降水(Non-Precip.)和降水(Precip.)的情况。可见,MMCR与CL31反演的CBH在非降水情况下的一致性较好,尤其当CBH高于4 km时,二者偏差明显较

小;但4 km以下MMCR部分结果比CL31高很多。原因主要有两方面^[17, 25]:一是MMCR在低空采用窄脉冲使得灵敏度不足,不能探测到一些很微弱的云层;二是CL31在灰霾和灰尘严重时会将这些目标物误识别为云层(2014年7-8月试验期间,雷达站点周边有大范围的道路施工等,造成了低空有大量灰尘)。这两方面原因导致MMCR和CL31探测的目标物可能不是同一层云。在降水情况下,MMCR的CBH明显比CL31偏低,因为雷达识别的下边界回波已经是雨滴,不是云滴。对比MMCR和HW8的CTH可见,由于时空分辨率的差异,二者点对点分布相对分散。但整体趋势是MMCR反演的CTH比HW8要高,这与Zhou等对北京地区的研究结果一致^[26]。对于两者的CTH,雷达反演的结果会更为准确,而卫星反演结果是偏低的,因为高原夏季强烈的地表热辐射会造成卫星辐射亮温会偏高(尤其对小尺度或厚度较薄的云层),进而使得CTH偏低。

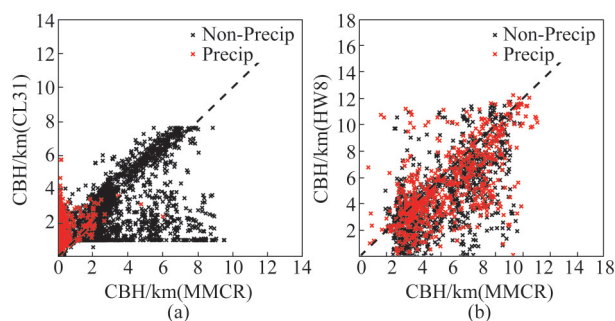


图3 MMCR与CL31反演的CBH对比(a), MMCR与HW8反演的CTH对比(b),图中黑色叉号表示非降水,红色叉号代表降水云,黑色虚线代表二者相等

Fig. 3 Comparisons of MMCR- and CL31 derived CBHs (a), and comparisons of MMCR- and HW8- derived CTHs (b); the black and red crosses indicate non-precipitating and precipitating cases, respectively, and the black dashed lines denote the equal lines

进一步统计了MMCR与CL31的差值 ΔCBH 、MMCR与HW8的差值 ΔCTH 的分布。图4(a)和(b)为非降水的误差, ΔCBH 和 ΔCTH 的统计样本数2413和1156,平均值分别为0.33 km和1.96 km,标准差分别为1.78 km和2.66 km。而在降水条件下,如图4(c)和(d), ΔCBH 和 ΔCTH 的样本数较少,分别为816和629, ΔCBH 和 ΔCTH 的平均值分别为-1.21 km和1.18 km,标准差分别为0.81 km和2.45 km。误差表明:MMCR在非降水条件下反演的CBH与CL31较为接近,雷达结果稍微偏高;但降水条件

下,二者差异明显增大,雷达会明显低估。MMCR反演的CTH整体比HW8高,但降水条件下 ΔCTH 有所减小,这是因为MMCR受到降水的衰减使得反演的CTH也会偏低。对于雷达和卫星的差异,Hollars等也发现GMS-5卫星也比MMCR反演的偏低,尤其对于薄云可偏低2 km左右^[27]。

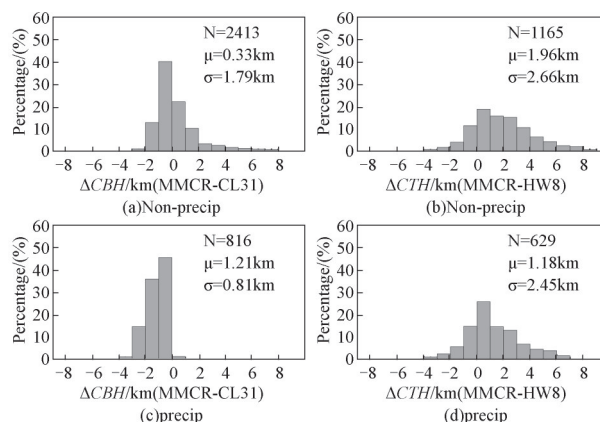


图4 MMCR/CL31反演的CBH误差 ΔCBH 和MMCR/HW8反演的CTH误差 ΔCTH 的分布,(a)和(b)为非降水云,(c)和(d)为降水云, N 为样本数, μ 为平均值, σ 为标准差

Fig. 4 Deviations between the MMCR- and CL31- derived CBHs (ΔCBH) and between the MMCR- and HW8- derived CTHs (ΔCTH), (a) and (b) represent non-precipitating clouds, (c) and (d) represent precipitating clouds, the case number N , the average μ , and the standard deviation σ for deviations are shown in each panel

3 那曲夏季空中云的垂直结构

利用MMCR在整个观测期间反演的宏观参数,对那曲夏季空中云层的垂直结构进行统计分析。考虑到降水对MMCR衰减影响较大,因此仅统计非降水云。

观测期间MMCR反演的CBH、CTH和CTK随高度的概率分布如图5(a)-(c)所示。可见,95%的CBH、CTH和CTK分布在1~8.5 km,2.5~11 km和0.5~6.5 km。CBH和CTH的分布规律都表现为随高度增加先增大后减小、再增大后又减小的双峰分布;CBH的两个峰值中心出现在2.5和6.5 km,CTH的两个峰值中心出现在3.5和8.5 km。云层主要为低云和高云,中云比例比相对较小,且大部分云层较为浅薄,70%云层厚度不超过2.5 km。

为进一步对比三个设备对云垂直结构探测的差距,图5(d)-(f)给出了CLN(MMCR/CL31)、CBH(MMCR/CL31)和CTH(MMCR/HW8)的对比结果。

对于CLN,那曲上空主要为单层云,MMCR对单层云的探测概率比CL31少,反之对多层云的探测概率则要高。因为激光穿越云层受到的衰减较大,因此CL31探测不到三层云。MMCR与CL31反演的CBH随高度分布整体是非常一致,但在1和2.5 km二者差异较大。对比雷达与HW8反演的CTH垂直分布,两种结果都反映出两个峰值区,这与Chen等^[28]的统计结果类似。MMCR反演的CTH整体分布比HW8高,在4.5~7.5 km,二者的一致性较好,但4.5 km以下,HW8的概率明显要大,而7.7 km以上则MMCR的概率更大。

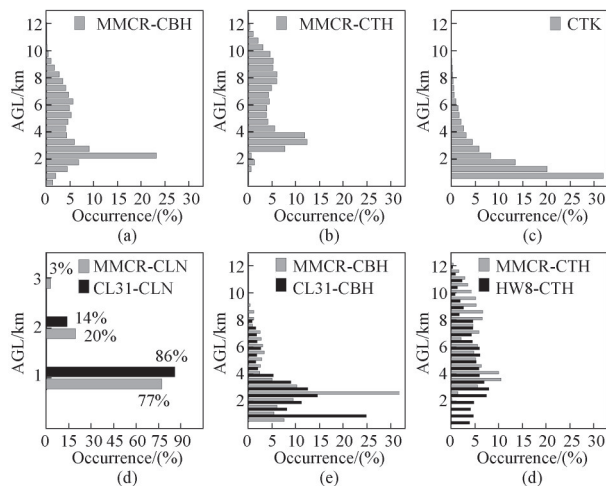


图5 观测期间CBH、CTH、CTK和CLN的随高度概率分布,(a)-(c)为2014和2015年7-8月雷达反演结果,(d)-(e)为2014年7-8月MMCR、CL31反演的CLN和CBH对比,(f)为2015年7-8月MMCR、HW8反演的CTH对比

Fig. 5 Occurrences of the MMCR-retrieved CBHs (a), CTHs (b), and CTKs (c) at different height levels during the observation period, and comparisons of the retrievals of CLNs (d), CBHs (e), and CTHs (f) derived by the MMCR, CL31, and HW8

4 那曲夏季空中云宏观参数的日变化特征

对观测期间雷达反演的CBH、CTH、CTK和云总量CF进行统计,分析那曲上空云宏观参数的日变化特征规律。总云量CF参考Liu等的方法计算^[29]。如图6(a)-(d)为四种宏观参数的逐时统计结果,可见,50%(盒须图25分位数至75分位数,下同)的CBH、CTH、CTK集中在2~6.3 km,3~7.5 km和0.8~3.5 km。三者的日变化都十分显著且规律也基本一致:在01-09时,由于大气层和地面逐渐降温、对流活动逐渐较少,CBH、CTH、CTK均逐渐减小;在10-20时,太阳辐射逐渐增强,地面和大气层逐渐升

温,使得云底逐渐升高,此外对流活动也较为活跃,云顶和云厚也逐渐增大;21-24时,日落后,大气层和地面又逐渐降温,CBH、CTH和CTK又逐渐降低。霍娟等^[30]对北京地区的研究也发现了类似的日变化趋势,但变化的时间比青藏高原更提前。而从日变化幅度来看,CTH的幅度最大,其次是CTK,最后是CBH,这说明对流活动对云顶高度的影响比热辐射对云底高度的影响更为显著。总云量CF整体呈“先减小后增大”的趋势,即从01-13时,CF逐渐减小,在13时达到全日最低;13-24时,CF又逐渐增大,24时达到最高;04时和22时,CF有小幅度增大和减小的波动,可能对流活动有关。CF最高为5%,最低为2.75%,最大差异可达1.8倍。

为了揭示三种设备反演的云宏观参数是否反映了相同的日变化规律,图6(e)和(f)还给出三个设备逐时的统计结果对比。需要注意的是HW8仅能在白天08-19时观测到CTH。对比MMCR和CL31反演的CBH可见,MMCR反演结果普遍比CL31高,在24小时内,MMCR的最小25分位数和最大75分位数分别为2.0和6.8 km,而对应的CL31观测结果为1.2和5.3 km。从平均结果来看(MMCR为带圆圈黑线,CL31为带圆圈蓝线),两者的日变化趋势基本一致。两者的差异在白天比在夜间大,这可能是由于白天湍流较强,那曲低空受尘土污染较严重,导致CL31出现更显著的低估现象。对比MMCR和HW8反演的CTH可见,MMCR的结果也比HW8大,在08-19时,MMCR的最小25分位数和最大75分位数分别为3.0和9.4 km,而对应的HW8结果分别为1.4和8.0 km。平均结果对比来看,两者的日变化趋势十分一致,HW8反演结果比MMCR平均低1.9 km。

5 讨论

5.1 衰减对云宏观参数探测的影响

MMCR探测时会受到水汽和云雨目标物衰减,尽管本文方法主要依赖于雷达能否探测到回波而非其强度,但当回波被衰减至无法被探测到时,反演的CBH和CTH等将出现误差。因此,对衰减的影响进一步讨论。该MMCR于2014年夏季也在广东阳江观测开展了观测试验,与它同址观测的还有一部垂直定向C波段连续波雷达(CWR),该C波段雷达同样具有较高的时空分辨率和灵敏度,因此我们选取这两部雷达的探测结果进行对比。

如图7为2014年6月10日积层混合性降水的

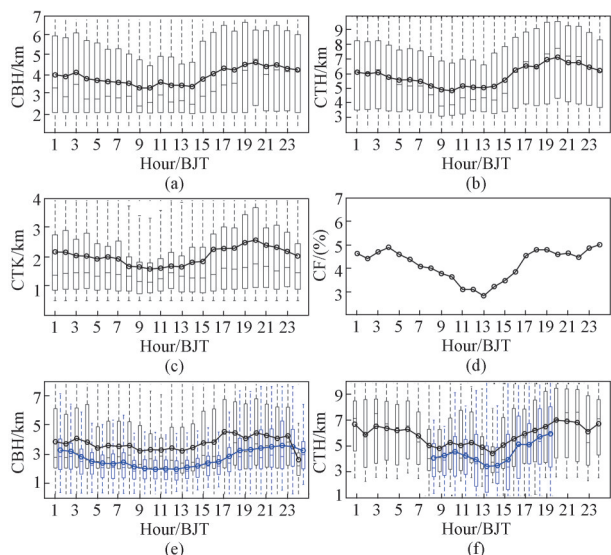


图6 云宏观参数的日变化,(a) - (d)分别为MMCR反演的CBH, CTH, CTK和CF,每小时对应一个盒须图,盒须图上下横线代表所有样本的25分位和75分位,中间横线为中位数,上下虚线甚至最大值和最小值,图中圆圈粗线代表平均值,(e)为MMCR与CL31(蓝)的CBH统计对比,(f)为MMCR与HW8(蓝)的CTH统计对比

Fig. 6 Diurnal variations of the MMCR-derived CBH (a), CTH (b), CTK (c), and CF (d); each hour corresponds to a boxplot, in which the bottom and top edges of the box indicate the 25th and 75th percentiles, the central cross-bar indicates the median, the upper and lower dotted line extend to the maximum and minimum; the solid lines with circles represent the averages; (e) is the statistical comparison of CBHs between MMCR and CL31; (f) is the statistical comparison of CTHs between MMCR and HW8

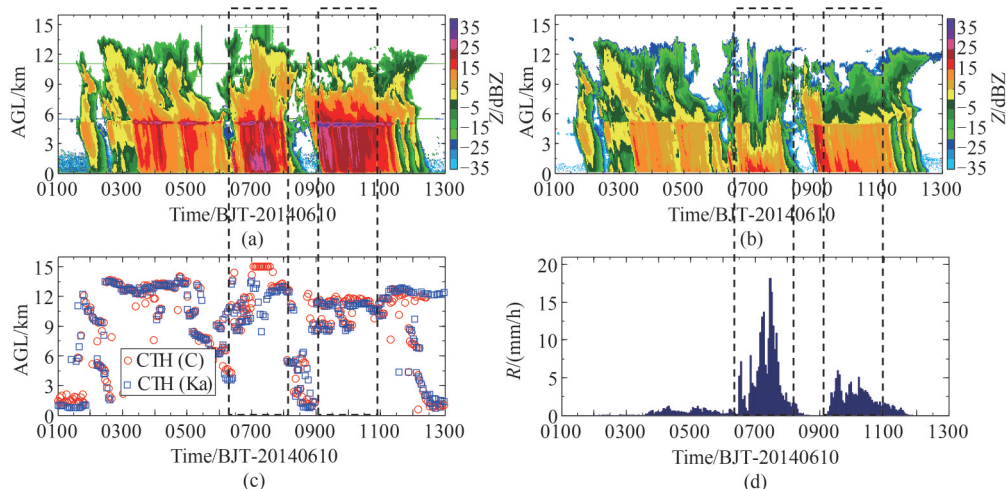


图7 广东阳江2014年6月10日积层混合性降水,CWR(a)和MMCR(b)观测的反射率因子 Z 、反演的CTH(c)和地面分钟雨强(d)
Fig. 7 Radar reflectivities of mixed precipitating clouds observed by the CWR (a) and MMCR (b) at Yangjiang of Guangdong on June 10, 2014; (c) and (d) are radar-derived CTHs and corresponding ground minutely rain rate R

两部雷达 Z 回波、反演的CTH和地面观测的分钟雨强。可见,在降水情况下,MMCR探测的回波强度明显较CWR低5~15 dB。MMCR受到的衰减与地面雨强密切相关,在地面降水较强的两个时段(虚线矩形框),雷达衰减明显更大。对比两个“强衰减时段”反演的CTH,MMCR反演的CTH比CWR偏低,尤其在0700-0730,对应的地面降水强度达到5~20 mm/h,而此时MMCR的回波出现凹陷,无法探测到云体的中上部,使得CTH严重偏低。但对于其他时段,降水强度基本不超过1 mm/h,此时MMCR反演的CTH和CWR非常一致。这说明,对于弱降水,MMCR反演的CTH是基本可靠的。而当降水明显时,反演CTH则会逐渐偏低,降水越强,偏低程度越大。

5.2 距离旁瓣对高原云宏观参数反演的影响

为了证实本文距离旁瓣回波判断和质量控制的有效性,并分析其对云宏观参数探测的具体影响,以下通过实例分析、仿真实验和统计三方面进行讨论。

5.2.1 距离旁瓣回波实例分析

利用广东阳江2014年6月6日CWR和MMCR两部雷达探测的对流性降水个例,对距离旁瓣回波进行分析。如图8(a) - (c)分别为CWR、MMCR旁瓣滤除前和MMCR旁瓣滤除后 Z 回波对比。可见,该对流性降水较为浅薄,两部雷达探测的回波较为一致,但存在两方面的差异。一是CWR由于对低空湍流更加敏感,因此在对流云周围出现了许多湍流回波;二是MMCR在2.04 km以上明显多出了截面

式的回波,这些回波外观与下方的强回波形状近似,且在CWR图中并不存在;因此,它们实际上是下方强回波形成的距离旁瓣回波。而滤除旁瓣后,MMCR云顶与CWR更吻合。

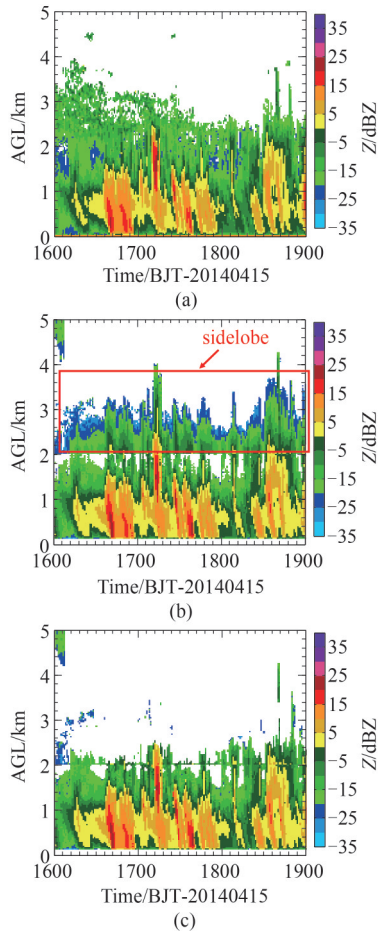


图8 广东阳江2014年4月15日对流性降水,CWR(a)、MMCR(b)和滤除旁瓣后MMCR(c)的反射率因子回波

Fig. 8 Radar reflectivities of CWR (a), MMCR before (b) and after (c) sidelobe removal for convective clouds and precipitation that happened at Yangjiang of Guangdong on April 15, 2014

5.2.2 距离旁瓣及对CBH和CTH探测影响的仿真实验

为进一步证实距离旁瓣回波质量控制对云宏观参数探测改善的有效性,本文还采用仿真实验进行分析和验证。仿真的具体步骤和方法为:

(1)云滴谱模拟:假设云滴谱满足Gamma分布^[31],如式(1),其中 r 为粒子半径 μm , $n(r)$ 为云滴谱(cm^{-3}), N 为单位体积内的粒子总浓度(cm^{-3}), σ 为滴谱宽度, r_0 为粒子平均半径(μm)。

$$n(r) = \frac{N}{\sqrt{2\pi}\sigma r} \exp\left(-\frac{(\ln r - \ln r_0)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

参考孙霞等的飞机观测结果^[24],将 N 等于 $10 \text{个} \cdot \text{cm}^{-3}$ 且平均半径为 $3 \mu\text{m}$ (该条件下液态含水量 $\approx 0.001 \text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)作为云底和云顶的云滴微物理状态。并假设云滴谱的平均直径和数浓度从云底至云中心逐渐增大,从云中心至云顶又逐渐减小,距离间隔设为 30m , r_0 以 $1 \mu\text{m}$ 间隔增大至 $50 \mu\text{m}$, N 以 5cm^{-3} 间隔多至 260cm^{-3} 。在 σ 值不变的情况下,上述可仿真出100组不同云滴谱,即构成一条云廓线。

(2)雷达回波强度谱和多普勒速度谱模拟:已知云滴谱的情况下,根据式(2)即可算出每个云滴半径对应的反射率因子,对于每组云滴谱,则可得一组雷达测量的回波强度谱 Z_i 。

$$Z_i = (2r_i)^6 N(r_i) \quad (2)$$

为了在频域中叠加距离旁瓣杂波,进一步利用“云滴下落末速度/半径”-式(3)^[32]和雷达气象方程式(4)将回波强度谱转换为多普勒速度谱。式中, $K_1 = 1.19 \times 10^6 \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, v 为液态云滴下落末速度($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$), i 为滴谱序号, C 为雷达常数, S_i 为多普勒信号谱(dBmw), R 为云滴与雷达之间的距离(km)。为了体现雷达信号的强度随距离变化,仿真时假设云体厚度为 3km ,分布在空中 $2 \sim 5 \text{km}$ 高度上,云廓线包含100个距离库。此外,对仿真的 S_i 叠加实测的雷达噪声,即随机叠入雷达晴空条件下实测的功率谱噪声 No_i (dBmw),形成最终的多普勒速度谱 P_i (dBmw)-式(5)。

$$v_i = K_1 r_i^2 \quad (3)$$

$$Z_i = \frac{S_i R^2}{C} \quad (4)$$

$$P_i = S_i + No_i \quad (5)$$

(3)叠加距离旁瓣信号:Liu^[23]等研究表明,在毫米波云雷达的多普勒速度谱中,距离旁瓣形成的信号可通过与同样多普勒速度位置的上下高度范围内的强信号来对比判断。如式(6), $P_{i,j}$ 为当前距离库 j 、谱点序号 i 的谱点功率, $P_{i,x}$ 代表相同谱点序号 i 、高度范围 x 的谱点功率, x 与脉冲压缩比有关。 T 为阈值,具体与雷达性能有关,Moran等取 30dB ^[22],而Liu等认为取 $42.3 \sim 60 \text{dB}$ 。

$$P_{i,x} > P_{i,j} + T \quad (6)$$

本文按照距离旁瓣信号在多普勒速度谱中的这种特点,逆向往多普勒速度谱中叠加距离旁瓣信号,即:通过式(6)判断当前每个距离库内的每个谱

点功率,若其超过雷达最小可测信号比 T ,则将差值叠加入脉压比对应高度范围($j - 60 < x < j + 60$)的距离库对应谱点上,以此遍历每个距离库的每个谱点。本文 T 的取值为 $30 + 10 \times \alpha$, α 为 $0 - 1$ 的随机数,即考虑到 T 目前仅为经验性的阈值,通过随机数使得仿真结果带有一定的变化性。

(4)Z廓线计算与云底、云顶的反演和对比:由于本文对云底、云顶高度等的反演是基于Z廓线,因此进一步从未叠加和已叠加距离旁瓣信号的多普勒速度谱中,分别计算出两种Z廓线(Z_{OR} 和 Z_{RS})。此外,利用本文距离旁瓣的质量控制方法,对已叠加距离旁瓣信号的 Z_{RS} 廓线进行处理,得到第三种Z廓线(Z_{QC})。对于三种廓线,分别反演出三组云底和云顶高度(CBH_{OR}/CTH_{OR} , CBH_{RS}/CTH_{RS} , CBH_{QC}/CTH_{QC})。由于 Z_{OR} 是从云滴谱仿真得到的,未受旁瓣和质控方法的影响,因此它反演的 CBH_{OR}/CTH_{OR} 可作为真值,验证 CBH_{RS}/CTH_{RS} 与它的差异,并验证旁瓣经过滤除后, CBH_{QC}/CTH_{QC} 与真值的差异。若 CBH_{QC}/CTH_{QC} 与 CBH_{OR}/CTH_{OR} 更加接近,即可说明旁瓣回波的去除即是有效的,可提高雷达对云底和云顶探测的精度。

为进一步体现云滴谱的变化,将 σ 值设为 $0.01 \sim 0.5$ (间隔为 0.01),模拟50根不同的云廓线,按照上述方法分别得到三种Z廓线与三种CBH和CTH。图9给出了 ΔCBH_{QC} ($CBH_{QC} - CBH_{OR}$)、 ΔCBH_{RS} ($CBH_{RS} - CBH_{OR}$)、 ΔCTH_{QC} ($CTH_{QC} - CTH_{OR}$)和 ΔCTH_{RS} ($CTH_{RS} - CTH_{OR}$)的频次分布。可见,距离旁瓣回波经过质量控制后,反演的CBH误差比未经质量控制的误差小很多, ΔCBH_{QC} 和 ΔCBH_{RS} 的平均值分别为 0.07 和 -0.73 km;对于云顶,反演误差也有所下降, ΔCTH_{QC} 和 ΔCTH_{RS} 的平均值分别为 0.5 和 0.64 km。由于相同强度的雷达信号所对应的Z与探测距离成正比,因此本文方法对云顶以上的旁瓣的滤除效果没有云底以下的效果明显。

5.2.3 距离旁瓣回波对云宏观参数探测影响统计

进一步讨论距离旁瓣回波对那曲上空不同云类云宏观参数探测的具体误差。将所有样本分为四类,即所有云(AC)和低云(LC)、中云(MC)、高云(HC)三类分别评估,三种云的分类借鉴吴翀等的方法^[17]。如表1给出了滤除距离旁瓣后和前反演误差 ΔCBH 、 ΔCTH 和 ΔCTK 的详细统计结果,包括误差的5 - 95分位数、平均值和标准差。可见,对于所有云

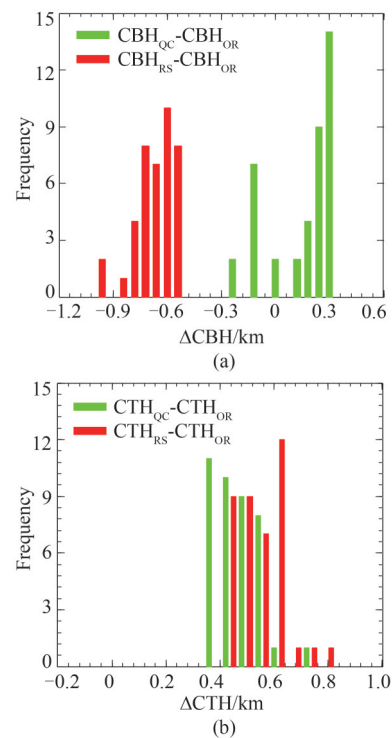


图9 仿真的50根云廓线所反演的云底(a)和云顶(b)误差频次分布

Fig. 9 Frequency distributions of CBH and CTH retrieved biases for 50 simulated cloud profiles

AC, 50%(25 - 75分位数)的 ΔCBH 、 ΔCTH 、 ΔCTK 分别分布在 $0.12 \sim 0.6$ km, $-1.05 \sim -0.18$ km和 $-1.02 \sim -0.21$ km,平均误差分别为 0.45 , -0.96 和 -0.79 km。说明距离旁瓣造成CBH低估、CTH和CTK高估,其中对CTH的影响最大。对于低云、中云和高云,CBH平均低估 0.23 、 0.49 和 0.65 km,CTH平均高估 0.97 、 1.01 和 0.64 km,CTK平均高估 0.79 、 0.85 和 0.43 km。表明距离旁瓣造成的CBH反演误差为“低云<中云<高云”,造成的CTH和CTK反演误差为“高于<低云<中云”。

5.3 雷达灵敏度对云底、云顶反演的影响

雷达反演的云底和云顶误差还与自身灵敏度有密切联系,为了大致估算该雷达反演结果所对应的云微物理特性,进一步统计了观测期间该雷达在不同高度探测到的最小反射率因子,如图10(a)所示。可见,由于该雷达在低空采用窄脉冲、中高空采用宽脉冲,灵敏度在 2.04 km有跳变, 2.04 km以下雷达灵敏度范围为 $-47.5 \sim -32$ dBZ左右, 2.04 km以上,雷达灵敏度范围为 $-45.7 \sim -27$ dBZ。假设每个高度上的云滴的数浓度为 10 cm^{-3} (或平均直径为 $10 \mu\text{m}$),则 $0.12 \sim 2.01$ km雷达探测的云滴平均直径

表 1 距离旁瓣滤除后和滤除前不同云类反演结果的 Δ CBH、 Δ CTH和 Δ CTK统计结果Table 1 Statistical results of Δ CBH, Δ CTH and Δ CTK for different cloud types after sidelobe removal

云宏观参数 反演误差	云类	误差统计量 /km						平均数	标准差
		5th	25th	50th	75th	95th			
Δ CBH	AC	0.03	0.12	0.33	0.60	1.17	0.45	0.53	
	LC	0.03	0.09	0.18	0.33	0.48	0.23	0.21	
	MC	0.03	0.21	0.51	0.69	1.08	0.49	0.35	
	HC	0.03	0.09	0.33	0.75	1.74	0.65	0.93	
Δ CTH	AC	-2.22	-1.05	-0.60	-0.18	-0.03	-0.96	1.37	
	LC	-2.01	-1.02	-0.63	-0.24	-0.03	-0.97	1.36	
	MC	-2.37	-1.08	-0.51	-0.12	-0.03	-1.01	1.47	
	HC	-1.83	-0.99	-0.18	-0.03	-0.03	-0.64	0.89	
Δ CTK	AC	-2.1	-1.02	-0.57	-0.21	-0.03	-0.79	0.97	
	LC	-1.86	-0.96	-0.48	-0.15	-0.03	-0.79	1.15	
	MC	-1.95	-1.08	-0.57	-0.21	-0.03	-0.85	1.07	
	HC	-1.23	-0.57	-0.27	-0.06	-0.03	-0.43	0.57	

为 $11\sim 20\ \mu\text{m}$ (或数浓度为 $356\sim 9.9\ \text{cm}^{-3}$), $2.04\sim 11.8\ \text{km}$ 上, 云滴平均直径为 $11.8\sim 24.2\ \mu\text{m}$ (或数浓度为 $234\sim 3.1\ \text{cm}^{-3}$)。此外, 还统计了雷达反演的 CBH 和 CTH 在空间位置上对应的反射率因子的概率分布, 如图 10(b) 所示。可见, CBH 和 CTH 对应的反射率因子分布在 $-40\sim -18\ \text{dBZ}$, 最大概率出现在

$32\ \text{dBZ}$, 对于云滴数浓度为 $10\ \text{cm}^{-3}$ (或平均直径为 $10\ \mu\text{m}$) 时, 它所对应的平均直径为 $20\ \mu\text{m}$ (或数浓度为 $631\ \text{cm}^{-3}$)。

6 结论

云宏观参数的探测和研究是正确评估云辐射效应和研究气候变化等的重要基础。本文提出了一种利用 Ka 波段 MMCR 反演云宏观参数的方法, 并利用 2014 和 2015 年 7-8 月观测资料, 对比了雷达与 CL31 和 HW8 的反演结果, 并讨论了衰减和距离旁瓣等对雷达反演的影响。本文主要结论如下:

(1) 较以往方法, 本文反演方法考虑了基于雷达数据质控, 尤其考虑了距离旁瓣回波影响和云层错位现象。分析表明, 当多层云间存在间隙或云层较强时, 本文反演方法的结果比以往方法更为合理和可靠。

(2) MMCR 反演的 CBH 比 CL31 偏高, 这是由于雷达灵敏度的限制, 也可能是 CL31 受到低空灰霾等污染所致。4 km 以上两者结果非常一致, MMCR 对高云和多层的反演结果优于 CL31。对降水云, MMCR 结果比 CL31 会偏低, 平均低 1.21 km。MMCR 反演的 CTH 比 HW8 要高, 考虑到高原夏季地表热辐射、云体尺度小、发展高度低等特点, 认为 MMCR 更为可靠。对非降水云, HW8 平均偏低 1.96 km; 对非降水云, HW8 平均偏低 1.18 km。

(3) 那曲夏季主要以低云和高云为主, 中云则偏少, 空中以单层云为主, 可占 76%。CBH 和 CTH 的垂直分布均表现为双峰分布, CBH 的两个峰值分别在 2.5 和 6.5 km, CTH 的两个峰值分别为 3.5 和

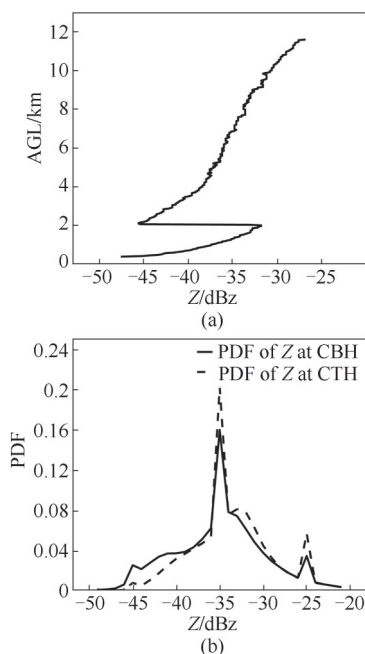


图 10 (a) 10 MMCR 最小可测反射率因子, (b) 雷达反演的 CBH 和 CTH 对应位置处的反射率因子概率分布

Fig. 10 (a) 10 Minimum reflectivities at different height levels observed by the MMCR during the observational period, and (b) probability distribution functions of radar reflectivities corresponding to the retrieved CBHs and CTHs

8.5 km。MMCR 和 CL31/HW8 探测的 CBH/CTH 分布基本一致,MMCR 对二层或三层云的探测结果要优于 CL31。那曲夏季 CBH、CTH、CTK 的日变化特征为:01~09 时逐渐减小,10~20 时逐渐增大,21~24 时又逐渐降低。总云量 CF 在 01~13 时逐渐减小,在 13 时达到全日最低;13~24 时又逐渐增大。MMCR 与 CL31、HW8 探测云宏观参数日变化规律非常一致。

(4)很高的卷层云和弱的降水对 MMCR 反演的 CBH 和 CTH 影响很小,但降水超过 1 mm/h 时,衰减会引起 CTH 被低估,雨强越大,低估越严重。MMCR 的旁瓣回波会造成 CBH 被低估、CTH 和 CTK 被高估,且对不同云类,造成的误差不同。距离旁瓣回波对云底反演的影响是“低云<中云<高云”,对云顶和云厚反演的影响是“高于<低云<中云”。

需要说明的是,本文反演时将非降水云和降水云区分并分别给出结果,降水云反演误差比非降水云更大,且与实际的降水强度有关,对很弱降水云 Ka-MMCR 反演的结果还是可靠的,但对降水明显的云层,反演结果误差会显著增大。但误差和雨强等的定量关系还有待进一步研究。对于脉冲压缩引起的距离旁瓣信号和回波,本文仅从它在多普勒速度谱中的基本特征进行仿真,实际观测的结果更为复杂,有待后续进一步研究。此外,本文对那曲地区云垂直结构和日变化的统计分析资料仅为 2014 - 2015 年夏季 7 - 8 月的资料,对青藏高原其他地区或其他季节也仍需进一步研究。

References

- [1] Gao X, Hsu K, Sorooshian S, *et al.* Precipitation estimation from remotely sensed imagery using an artificial neural network cloud classification system [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2004, **43**(12): 1834-1852.
- [2] Webster P J, Stephens G L. Cloud - radiation interaction and the climate problem [J]. *The Global Climate Cambridge University Press*, 1984, pp:63-78.
- [3] Reddy N N, Ratnam M V, Basha G, *et al.* Cloud vertical structure over a tropical station obtained using long-term high-resolution radiosonde measurements [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(16): 11709-11727.
- [4] Chen S S, Kerns B W, Guy N, *et al.* Aircraft observations of dry air, the ITCZ, convective cloud systems, and cold pools in MJO during DYNAMO [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2016, **97**(3): 405-423.
- [5] Aydin K, Singh J. Cloud ice crystal classification using a 95-GHz polarimetric radar [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2004, **21**(11): 1679-1688.
- [6] Cazorla A, Casquero J A, Roman R, *et al.* Near-real-time processing of a ceilometer network assisted with sun-photometer data: monitoring a dust outbreak over the iberian peninsula [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(19): 11861-11876.
- [7] LI Hao-Ran, SUN Xue-Jin, LIU Lei, *et al.* Cloud base height estimation based on template matching [J]. *Journal of the Meteorological Sciences* (李浩然,孙学金,刘磊,等。基于模板匹配的云顶高度估计。气象科学), 2015, **35**(05): 610-615.
- [8] Xi B, Dong X, Minnis P, *et al.* A 10-year climatology of cloud fraction and vertical distribution derived from both surface and GOES observations over the DOE ARM SPG site [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, **115**(D12): D12124.
- [9] ZHANG Tao, ZHENG Jia-Feng, LIU Yan-Xia. A study on the vertical structure and microphysical characteristic of convective cloud and precipitation over Tibetan Plateau by using Ka-band cloud radar [J]. *Journal of Infrared and millimeter Waves* (张涛,郑佳锋,刘艳霞。利用 Ka 波段云雷达研究青藏高原对流云和降水的垂直结构及微观物理特征。红外与毫米波学报), 2019, **38**(06): 777-789
- [10] LI Yu-Lian, SUN Xue-Jin, ZHAO Shi-Jun, *et al.* Analysis of snowfall's microphysical process from Doppler spectrum using Ka-band millimeter-wave cloud radar [J]. *Journal of Infrared and millimeter Waves* (刘玉莲,孙学金,赵世军,等。Ka 波段毫米波云雷达多普勒谱降雪微物理特征分析。红外与毫米波学报), 2019, **38**(02): 245-253.
- [11] YAN Wei, REN Jian-Qi, LU Wen, *et al.* Cloud phase discrimination technology based on Spaceborne millimeter wave radar and lidar data [J]. *Journal of Infrared and millimeter Waves* (严卫,任建奇,陆文,等。联合星载毫米波雷达和激光雷达资料的云相态识别技术。红外与毫米波学报), 2011, **30**(01): 68-73.
- [12] WANG Zhe, WANG Zhen-Hui, CAO Xiao-Zhong, *et al.* Consistency analysis for cloud vertical structure derived from millimeter cloud radar and radiosonde profiles [J]. *Acta Meteorologica sinica* (王喆,王振会,曹晓钟,等。毫米波雷达与无线电探空对云垂直结构探测的一致性分析。气象学报), 2016, **74**(5): 815 - 826.
- [13] Zhang Y, Zhou Q, Lv S, *et al.* Elucidating cloud vertical structures based on three-year Ka-band cloud radar observations from Beijing, China [J]. *Atmospheric Research*, 2019, **222**(JUL): 88-99.
- [14] Liang H, Difei D, Shouting G, *et al.* The Seasonal and Interannual Variation of Diurnal Precipitation over the Tibetan Plateau and Its Downstream Regions Observed by the Tropical Rainfall Measuring Mission [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2015, **8**(6): 365-370.
- [15] Shou Y, Feng L U, Liu H, *et al.* Satellite-based observational study of the Tibetan Plateau Vortex: features of deep convective cloud tops [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2019, **36**(2): 189-205.
- [16] Yan Y, Liu Y. Vertical Structures of convective and stratiform clouds in Boreal summer over the Tibetan Plateau and its neighboring regions [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2019, **36**(10): 1089-1102.
- [17] WU Chong, LLU Li-Ping, ZHAI Xiao-Chun. 2017. The comparison of cloud base observations with Ka-band solid-state transmitter-based millimeter wave

- cloud radar and ceilometer in summer over Tibetan Plateau [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (吴翀, 刘黎平, 翟晓春. Ka波段固态发射机体制云雷达和激光云高仪探测青藏高原夏季云底能力和效果对比分析. *大气科学*), 2017, **41**(04): 659 - 672.
- [18] CHANH Yi, GUO Xue-Liang. Characteristics of convective cloud and precipitation during summer time at Naqu over Tibetan Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*. (常祎, 郭学良. 青藏高原那曲地区夏季对流云结构及雨滴谱分布日变化特征. *科学通报*), 2016, **61**: 1706 - 1720.
- [19] Zheng J, Liu L, Chen H, *et al.* Characteristics of warm clouds and precipitation in South China during the Pre-Flood season using data sets from a Cloud Radar, a ceilometer, and a disdrometer [J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**(24): 3045.
- [20] Görsdorf U, Lehmann V, Bauer-Pfundstein M, *et al.* A 35-GHz Polarimetric doppler radar for Long-Term observations of cloud Parameters-Description of System and Data Processing [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2015, **32**(4): 675-690.
- [21] ZHENG Jia - Feng, LIU Li - Ping, ZENG Zheng - Mao, *et al.* Ka - band millimeter wave cloud radar data quality control [J]. *Journal of Infrared and millimeter Waves* (郑佳锋, 刘黎平, 曾正茂, 等. Ka波段毫米波云雷达数据质量控制方法. *红外与毫米波学报*), 2016, **35**(6): 748-757.
- [22] Moran K P, Martner B E, Post M J, *et al.* An unattended cloud-profiling radar for use in climate research [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, **79**(3): 443-455.
- [23] Liu L, Zheng J. Algorithms for doppler spectral density data quality control and merging for the Ka-band solid-state Transmitter Cloud Radar [J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**(2): 209.
- [24] SUN Xia, YIN Yan, HAN Yang, *et al.* Distribution characteristics of cloud particles and cloud condensation Nuclei during Hazefog events in Shijiazhuang [J]. *China Environmental Science* (孙霞, 银燕, 韩洋, 等. 石家庄地区雾霾天气下云滴和云凝结核的分布特征. *中国环境科学*), 2012, **32**(7): 1165-1170.
- [25] Guo J, Liu H, Wang F, *et al.* Three-dimensional structure of aerosol in China: A perspective from multi-satellite observations [J]. *Atmospheric Research*, 2016, **178-179**: 580-589.
- [26] Zhou Q, Zhang Y, Li B, *et al.* Cloud-base and cloud-top heights determined from a ground-based cloud radar in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **201**: 381-390.
- [27] Hollars S, Fu Q, Comstock J M, *et al.* Comparison of cloud-top height retrievals from ground-based 35 GHz MCR and GMS-5 satellite observations at ARM TWP Manus site [J]. *Atmospheric Research*, 2004, **72**(1): 169-186.
- [28] Chen D, Guo J, Wang H, *et al.* The cloud top distribution and diurnal variation of clouds over East Asia: preliminary results from Advanced Himawari Imager [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, **123**(7): 3724-3739.
- [29] LIU Li-Ping, ZHENG Jia-Feng, RUAN Zheng, *et al.* The preliminary analyses of the cloud properties over the Tibetan Plateau from the field experiments in clouds precipitation with the various radars [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (刘黎平, 郑佳锋, 阮征, 等. 2014年青藏高原云和降水多种雷达综合观测试验及云特征初步分析结果. *气象学报*), 2015, **73**(4): 635-647.
- [30] HUO Juan, LYU Da-Ren, DUAN Shu, *et al.* Cloud macro-physical characteristics in Beijing based on Ka Radar Data during 2014-2017 [J]. *Climatic and Environmental Research* (霍娟, 吕达仁, 段树, 等. 基于2014-2017年Ka毫米波雷达数据分析北京地区云宏观分布特征. *气候与环境研究*), 2020, **25**(01): 45-54.
- [31] Kollias P, Rémillard J, Luke E, *et al.* Cloud radar doppler spectra in drizzling stratiform clouds: I. Forward modeling and remote sensing applications [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, **116**(D13): 201.
- [32] YANG Jun, CHEN Bao-Jun, YIN Yan. *Cloud and precipitation physics* [M]. Beijing: Meteorological Press (杨军, 陈宝君, 银燕. *云降水物理*). 北京: 气象出版社), 2011.